

## Verfahren zur Stabilisierung von technischen Prozessen

Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur Stabilisierung von technischen Prozessen resp. technischen Anlagen und ist geeignet zur Stabilisierung einer verfahrens- und fertigungstechnischen Anlage.

Es ist allgemein bekannt, für die Qualitätsgrößen eines Prozesses Toleranzbänder vorzugeben, in denen ein Produktionsprozess ein gewünschtes Produkt produzieren soll.

Weiterhin ist bekannt, wichtige Qualitätsgrößen eines Prozesses durch Anwendung mathematischer, statistischer oder neuronaler Algorithmen zu modellieren und vorherzusagen, um damit im voraus die Auswirkungen von Stellgrößenveränderungen auf den Produktionsprozess zu simulieren und nur bei gewünschten Resultaten für die Qualitätsgrößen die Einstellungen am Prozess real durchzuführen.

Es ist ebenso bekannt, mittels spezieller mathematischer Optimierungsverfahren, die optimalen Werte der wichtigsten Einflussgrößen für einen vorgegebenen Qualitätszielwertes zu berechnen, siehe E. Schöneburg et al., Genetische Algorithmen und Evolutionsstrategien, Addison-Wesley, Deutschland, 1994, S. 286-291 und S. 366-378 und US 6.314.413 B1.

Dennoch gibt es in technischen Prozessen sehr häufig Fälle, wo der vorgegebene numerische Qualitätswert der Zielgröße nur mit sehr grossen Aufwand oder auch gar nicht stabil realisiert werden kann, da der Produktionsprozess und mit ihm die Einflussgrößen stets gewissen Schwankungen bzw. Störungen unterliegen. Deshalb gibt es sehr viele Produktionsprozesse bei dem das zu produzierende Produkt nicht mit ausreichender Stabilität in der vorgegebenen Qualität hergestellt werden kann.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zur Stabilisierung von technischen Prozessen anzugeben, das für die Qualitätsmerkmale eines technischen Produktes innerhalb der vorgegebenen Toleranzgrenzen denjenigen numerischen Zielwert vorgeben kann, bei dem dieses Produkt maximal stabil (oder auch flexibel) produziert wird und für den zusätzlich alle einzustellenden Werte der jeweiligen Stellgrößen vorgegeben werden können.

Diese Aufgabe wird gelöst durch ein im Anspruch 1 angegebenes Verfahren zur Optimierung der Produktion, bei dem mittels einer Global Scaling Kettenbruchanalyse die superflexiblen und superstabilen Werte der Qualitäts- und Einflussgrößen berechnet und dem Produktionsprozess vorgegeben werden können.

Vorteilhafte Ausgestaltungen sind in weiteren Ansprüchen angegeben.

Global Scaling (GS) ist ein eingeführter physikalischer Begriff, der verdeutlicht, dass die Verhältnisse physikalischer Größen wie Massen, Temperaturen, Gewichte bei realen Systemen grösseninvariant sind und sich regelmässig logarithmisch wiederholen, siehe H. Müller, Global Scaling, Special 1, Ehlers Verlag 2001, S. 161/162.

Erstmals aufgezeigt wurde dieser grösseninvariante Zusammenhang in biologischen Prozessen von Čislenko, der die Verteilung der Artenvielfalt der Flora und Fauna in Abhängigkeit ihrer Grösse und des Gewichtes über eine logarithmische Gerade darstellte, siehe L. Čislenko, Die Struktur der Fauna und Flora im Zusammenhang mit der Körpergrösse der Organismen, Moskau, 1981, S. 89-98. Dabei wurde gezeigt, dass die biologischen Systeme nicht beliebig auf der logarithmischen Grössenachse verteilt sind, sondern ihr Vorkommen in stets gleichen periodischen Abständen auf der logarithmischen Geraden ihr Maximum bzw. Minimum haben. In technischen Systemen äussert sich dieser Zusammenhang darin, dass in einem technischen Prozess niemals alle durch den Prozess möglichen Prozesswerte gleichwahrscheinlich eingenommen werden können.

Betrachtet man das Histogramm einer beliebigen technischen Messgrösse eines Intervalls  $z_1$  bis  $z_0$  ungeglättet, so erkennt man neben der prozessabhängigen Hauptstruktur

des aufgenommenen Histogrammes, z.B. einer Gauss-, Poisson- oder Gleichverteilung, dass in der Feinstruktur dieses Histogrammes gewisse Messwerte häufiger auftreten, andere weniger häufiger. Mit bisher bestehenden Verfahren werden diese Unebenheiten weggefiltert, da sie als zufällige Störungen interpretiert werden. In der GS-Theorie gelten diese verschiedenen Ausprägungen einer Messgrösse als wesentlich, da sie reproduzierbar sind.

Mit Hilfe des GS lassen sich damit insbesondere diejenigen physikalischen Werte berechnen, die durch technische Prozesse bevorzugt eingenommen werden, denn nach GS können die von einem technischen oder natürlichen Prozess bevorzugten Werte durch eine Kettenbruchzerlegung nach Leonard Euler, Über Kettenbrüche, 1737, Leonard Euler, Über Schwingungen einer Saite, 1748, L. Euler, Leonhard Euler und Christian Goldbach: Briefwechsel 1729 - 1764 (eds.: A. P. Juskevici, E. Winter), Abh. Deutsche Akad. Wiss. Berlin, Akademie-Verlag 1965, ermittelt werden, denn nach Euler ist bekannt, dass jede reelle Zahl  $x$  durch ihren Kettenbruch entsprechend Gleichung (1) dargestellt werden kann:

$$x = n_0 + z / (n_1 + z / (n_2 + z / (n_3 + z / (n_4 + z / (n_5 + \dots)))))) \quad (1)$$

Die Grösse  $z$  stellt dabei den sog. Teilzähler dar, dessen Wert nach GS für technische Optimierungen auf den Wert 2 festgelegt wird.

Da die Skaleninvarianz in logarithmischen Massstäben auftritt, siehe Čislenko, werden im GS-Verfahren alle Analysen von zur Basis  $e$  logarithmierten Grössen durchgeführt. Damit entsteht Gleichung (2)

$$\ln x = n_0 + 2 / (n_1 + 2 / (n_2 + 2 / (n_3 + 2 / (n_4 + 2 / (n_5 + \dots)))))) \quad (2)$$

Die jeweiligen Zahlenwerte hängen von den zugrundeliegenden Masseinheiten ab, deshalb sind in GS für alle gängigen Masse sog. Eichmasse  $y$  eingeführt, zu denen die auszuwertenden Grössen ins Verhältnis gesetzt werden müssen. Dadurch entsteht die Gleichung (3) als spezielle Grundgleichung des GS, siehe H. Müller, Global Scaling, Special 1, Ehlers Verlag 2001, S. 157:

$$\ln(x/y) = n_0 + 2 / (n_1 + 2 / (n_2 + 2 / (n_3 + 2 / (n_4 + 2 / (n_5 + \dots)))))) \quad (3)$$

In Anwendungen von GS wird diese Grundgleichung (3) durch einen Winkel  $\phi$  erweitert, mit  $\phi = 0$  bzw.  $\phi = 3/2$ , um den das logarithmische Verhältnis  $\ln(x/y)$  vor einer Kettenbruchzerlegung verschoben werden kann.

Dadurch entsteht die allgemeine Grundgleichung (4) des Global Scaling, nach der jede beliebige technische Messgrösse  $x$  zerlegt werden kann:

$$\ln(x/y) - \phi = n_0 + 2 / (n_1 + 2 / (n_2 + 2 / (n_3 + 2 / (n_4 + 2 / (n_5 + \dots)))))) \quad (4)$$

mit  $x$  ist die technische Messgrösse, gemessen in ihrer jeweiligen Einheit,  $y$  ist das natürliche Eichmass dieser Grösse, und  $\phi = 0$  bzw.  $\phi = 3/2$ .

Die Koeffizienten  $[n_0, n_1, n_2, \dots]$  müssen aufgrund der Konvergenzbedingung für Kettenbrüche ihrem absoluten Betrag nach stets grösser als der Zähler sein, siehe O. Perron, Die Lehre von den Kettenbrüchen, Teubner Verlag Leipzig, 1950, S. 62 und sind stets durch 3 teilbare ganze Zahlen.

Diese Koeffizienten entscheiden über die charakteristischen Eigenschaften der Messgrösse  $x$ , deshalb stellen sie einen sog. Kettenbruch-Code dar. Messgrössen deren Kettenbruchzerlegung nur einen Wert für  $[n_0]$  ergibt, befinden sich in einem Hauptknoten (Knoten der Ebene  $n_0$ ), Messgrössen mit Werten von  $[n_0, n_1]$  in einem Subknoten der Ebene  $n_1$  usw. Kernbereich eines Knotens  $n_i$  ist der Bereich in unmittelbarer Nähe eines Knotens, d.h. Subknoten  $n_j$  liegt im Bereich  $-9$  bis  $9$ , mit  $j=i+1$ . Nach der GS-Theorie sind nun folgende physikalischen Eigenschaften in Abhängigkeit des Kettenbruch-Codes  $[n_0, n_1, n_2, n_3, \dots]$  bekannt:

Kettenbruch-Code Beispiel	Eigenschaft	Bemerkungen
$[n_0 +3 -3 +3 -3 \dots]$	Superflexibilität	Messgrösse befindet sich am Rand eines Knotenbereiches, in maximaler Entfernung vom stark fluktuierenden Kernbereich, in einem sog. superflexiblen Bereich. Das zugrundeliegende System reagiert flexibel auf Veränderungen und Störungen
$[n_0 54 \dots]$ $[n_0 57 \dots]$ $[n_0 60 \dots]$	Superstabilität	Messgrösse befindet sich auf einem Knoten, ist deshalb extrem stabil. Kann aber nur bei genauer Präzision erreicht werden, ansonsten ist Messgrösse im stark fluktuierenden Kernbereich des Knotens
$[n_0 n_1 \dots 4] \dots [n_0 n_1 \dots 5]$ $[n_0 n_1 \dots 7] \dots [n_0 n_1 \dots 8]$	Relative Ruhe	Messgrösse befindet sich zwischen zwei Subknotenbereichen. Messgrösse ist damit in einem Bereich relativer Fluktuationsarmut

Damit kann für jede beliebige technische Messgrösse nach einer GS-Analyse erkannt werden, ob diese Grösse stabil ist, grossen Schwankungen unterliegt, flexibel auf Störungen reagiert oder in einem Bereich relativer Fluktuationsarmut ist. Alle weiteren Kombinationen ergeben sich aus diesen Überlegungen.

Beim erfindungsgemässen Verfahren wird das Ziel verfolgt, nicht nur die optimalen Werte des Produktes, z.B. das Drehmoment eines Maschinenteils, die optimale Glanzcharakteristik eines Lackes oder die optimale Haftung eines Reifens zu ermitteln, sondern gleichzeitig diejenigen Werte der Einflussgrössen zu berechnen, die letztendlich zu dem jeweiligen Produktwert führen und die gleichzeitig einen besonders robusten, stabilen bzw. flexiblen Produktionsprozess bedingen.

Die Aufgabe wird erfindungsgemäss mit folgenden Verfahrensschritten gelöst:

1. Bestimmung der vorhandenen Qualitätsgrössen und ihrer zulässigen Toleranzen (Eingabe der Toleranzen für Zielgrössen)
2. Global Scaling Analyse innerhalb der vorgegebenen Toleranzen für jede Qualitätsgrösse zum Ermitteln aller GS-optimalen Werte dieser Qualitätsgrösse
3. Aufnahme der Prozessdaten
4. Prozessmodellierung und Sensitivitätsanalyse der vorhandenen Einflüsse zur Ermittlung der lokalen Prozesseinflüsse, die letztendlich zur Produktion mit diesem

Qualitätswert geführt haben und damit zur Bestimmung der wichtigsten Einflussgrössen

5. Prozessoptimierung für den bzw. für alle vorgegebenen GS-optimalen Zielgrößenwerte durch Rückrechnung auf die Werte der wichtigsten Einflussgrößen
6. Durchführung einer Global Scaling Analyse der wichtigsten Einflussgrößen für die Auswahl des GS optimalen Zielgrößenwertes, wenn es aus Produktsicht im vorgegebenen Intervall mehrere gleichberechtigte GS-Werte für das Produkt gibt.
7. Bestimmung des optimalen Prozesszustandes und Rückrechnung der dazugehörigen Einflussgrößen, insbesondere der Stellgrößen (Auswahl des GS-optimalen Zielgrößenwertes)
8. Ausgabe der Stellgrößen an den Prozess und ggf. Rückkopplung zu Schritt 3 (und Rückrechnung)

Jeder einzelne Verfahrensschritt wird im weiteren detailliert am Beispiel der Herstellung von Scharnieren eines Automobilzulieferers an Hand einer Zeichnung beschrieben:

In der Zeichnung zeigen die:

- Fig. 1 Gemessenes Drehmoment MD eines produzierten Scharnieres über die Zeit (Zeitachse in 10 Sekunden-Takt)
- Fig. 2 Histogramm des Drehmomentes MD mit dem Messbereich 0 Nm bis 2,5 Nm auf der X-Achse
- Fig. 3 Ein Histogramm des Drehmomentes MD mit dem Messbereich 1,0 Nm bis 1,5 NM auf der X-Achse
- Fig. 4 Feinstruktur von Histogrammen zweier Produktionslinien für rechte und linke Scharniere, die 3 Tage lang zeitgleich produziert wurden  
a), Scharniere links MDL b) Scharniere rechts MDR
- Fig. 5 Werkzeug GSC3000 zur GS-Analyse von physikalischen und technischen Grössen

- Fig. 6 GS-Analyse des Drehmomentes (In Ncm) von Kfz-Scharnieren
- Fig. 7 Histogramm der erzeugten Drehmomente im Bereich 0,87 bis 0,92 Nm
- Fig. 8 Sensitivitätsanalyse einer Scharnierproduktion (Sensitivity der Inputs zur Output-Variablen MD)
- Fig. 9 Prozessoptimierung mittels Self-Organizing Maps durch automatische Rückrechnung von der Zielgrösse MD auf die einzustellenden Eingangswerte
- Fig. 10 Darstellung von möglichen Eingangsgrössen für Scharniere mit Zielgrösse Drehmoment MD = 1,392 Nm
- Fig. 11 Histogramm der Temperatur TW einer Produktionslinie für die Fertigung von Scharnieren

#### 1. Aufnahme der Qualitätsgrössen und der zulässigen Toleranzen

Die wesentliche Qualitätsgrösse eines Scharniers ist neben seinen geometrischen Abmassen das sogenannte Drehmoment oder Schwenkmoment MD. Durch die Anwendungen des Scharniers im hier dargestellten Anwendungsfall muss das Drehmoment in einem engen Toleranzband, im dargestellten Beispiel 0,50 – 2 Nm, produziert werden. Welche Werte es innerhalb des Toleranzbands einnehmen soll, ist durch die Anwendung nicht explizit vorgegeben. Im vorliegenden Montageprozess ist durch eine 100%-Qualitätskontrolle nach der Montage für jedes einzelne Scharnier das Drehmoment MD ausgemessen worden und beispielhaft über einen Zeitraum von mehreren Tagen in Fig. 1 dargestellt:

Die Figuren 2 und 3 stellen das Histogramm des aufgenommenen Drehmomentes MD mit der Intervallbreite 1 Ncm einmal für den gesamten Messbereich von 0 – 2,50 Nm und einmal für den Teilbereich 1,0 – 1,50 Nm dar.

Die Feinstruktur der Histogramme in beiden Darstellungen zeigt die unterschiedliche Ausprägung der realisierten Drehmomentwerte im realen Prozess. Beispielsweise wird der Wert 1,26 Nm (126 Ncm) im dargestellten Zeitraum 70 Mal, der Wert 1,27 Nm (127 Ncm) dagegen nur 30 Mal realisiert. Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die Extremwerte dieser Häufigkeitsverteilung:

Gemessene Häufigkeit	Extremwerttyp	Mittelpunkte der Intervalle der gemessenen Drehmomentwerte, in Ncm
> 64	Häufungsintervalle	101, 113, 126, 130, 134
< 42	Lückenintervalle	100, 104, 106, 112, 127

Diese Feinstruktur ist kein Zufall, da sie sich bei jedem anderen Zeitraum in einer ähnlichen Struktur stets reproduzieren lässt und für zeitgleich produzierte Scharniere sogar ähnlich ist wie Fig. 4 zeigt.

Man erkennt, dass für beide Produktionslinien eine Feinstruktur der Histogramme existiert und diese eine gewisse Ähnlichkeit besitzen. Untersucht man die Produktionslinien über mehrere Monate so stellt man fest, dass es auf jeder Produktionslinie und an jedem Tag Drehmomente gibt, die besonders häufig produziert werden und Drehmomente, die besonders selten produziert werden. Da die GS-Theorie genau eine solche Verteilung und Histogrammstruktur von physikalischen und technischen Messgrößen voraussagt und sich die Produktionslinien von Scharnieren damit GS-konform verhalten, wird eine GS-Optimierung durchgeführt, um eine GS-optimale Produktionslinie aufzubauen.

Im weiteren wird beispielhaft die GS-Analyse des Drehmomentes beschrieben, um die stabilen bzw. flexiblen Drehmomentenwerte zu berechnen.

## 2. Global Scaling Analyse der Zielgrösse Drehmoment

### 2.1. Kettenbruchzerlegung des Drehmomentes

Gegeben ist ein Drehmoment MD in einem Toleranzbereich zwischen 50 Ncm und 200 Ncm. Gesucht ist der nach GS-optimale Wert innerhalb des Toleranzbereiches. Das Eichmass  $y$  für das Drehmoment ist  $1,503277E-10 \text{ Nm} = \text{Protonenmasse} \cdot c^2$ , siehe Absatz Eichmasse in H. Müller, Global Scaling, Special1, Ehlers Verlag 2001, S. 129.



Nach Gleichung (4) mit  $\phi = 3/2$  ergibt sich eine Kettenbruchzerlegung und die Berechnung der Koeffizienten  $n_0, n_1, n_2$  usw. Der Wertebereich 50 Ncm - 200 Ncm entspricht dem Knotenbereich  $[24 \pm 1]$ , also  $50 \text{ Ncm} = [24; -3]$  und  $200 \text{ Ncm} = [24; +3]$ .

Die Berechnung der Drehmomentenwerte durch Kettenbrüche nach Gleichung (4) wurde beispielhaft mit dem Werkzeug GSC3000 des Institutes für Raum-Energie-Forschung, München (IREF) durchgeführt und ist in Fig. 5 exemplarisch für den Drehmomentwert  $MD = 1,27 \text{ Nm}$  dargestellt.

Die lineare Mitte des Toleranzbereiches 0,5 Nm und 200 Nm und vorgegebene Zielgrösse einer Steuerung für MD ist  $125 \text{ Ncm} = [24; +6, -3, +3, \dots]$  was die Dominanz des Wertes 125 Ncm erklärt. Der Wert 127 Ncm ist nach GS gleich  $[24; +6, -5]$ . In den Randbereichen  $[24; -3]$  bzw.  $[24; +3]$  bzw. in den Sublücken, z.B. zwischen  $[24; +5] = 133 \text{ Ncm}$  und  $[24; +4] = 146 \text{ Ncm}$ , sind die Fluktuationen minimal ausgeprägt. Maximale Fluktuationen sind innerhalb des Kernbereichs von  $[24; -10] = 73 \text{ Ncm}$  bis  $[24; +10] = 109 \text{ Ncm}$  zu erwarten.

Die graphische Darstellung in Fig. 6 der Drehmomentwerte in Abhängigkeit von  $n_0$  und  $n_1$  und der Phase  $\phi$  verdeutlicht die Zusammenhänge für die Werte  $\phi = 0$  bzw.  $\phi = 3/2$ ,  $n_0=24$  und  $n_1 = -3$  bis  $-\infty$  bzw.  $n_1 = +3$  bis  $+\infty$ . Die durch den Kettenbruch nach Gleichung (4) berechneten Werte des Drehmomentes von 33 Ncm bis 1082 Ncm sind dabei über die Längsachse der Fig. 6 aufgetragen.

Wäre der Prozess der Scharnierherstellung weder geregelt noch gesteuert, so würde sich die Häufigkeit der technisch produzierten Drehmomentwerte nach Fig. 6 verteilen. Die weissen Flächen in Fig. 6 verdeutlichen Drehmomentwerte, die relativ selten auftreten (sog. Lückenbereiche), die grauen Flächen verdeutlichen Bereiche mit häufigen Drehmomenten und die dunkelgrauen Flächen stellen sog. Knotenbereiche des Drehmomentes dar.

Da aber im vorliegenden Produktionsfall der Produktionssteuerung der Zielwert  $MD_{\text{SOLL}}=125 \text{ Ncm}$  vorgegeben wurde, weicht die Verteilung der technisch realisierten Drehmomente von dieser theoretischen Verteilung ab und stellt sich nach Fig. 2 dar.

Nach GS können Werte in den Knotenbereichen, hier um 89 Ncm, 124 Ncm und 173 Ncm, technisch nicht stabil produziert werden, da in Knotennähe stets Fluktuationen und Störungen auftreten werden, siehe Tabelle, Seite 5 und exemplarisch Fig. 7.

In Fig. 7 erkennt man, dass es um den Bereich 0,88 Nm bis 0,92 Nm zu grossen Fluktuationen der tatsächlich produzierten Drehmomente von Scharnieren kommt, was bedeutet, dass der Wert 0,89 Nm in der Praxis nicht stabil produziert werden kann.

Für die Global Scaling Optimierung der Produktion von Scharnieren gibt es im wesentlichen zwei Ziele:

Das erste Ziel besteht in der Einhaltung der zu produzierenden Produktqualität. Das Drehmoment MD jedes Scharniers soll möglichst in der Mitte des Toleranzintervalls mit minimalen Toleranzschwankungen  $\Delta MD$  produziert werden. Optimal sind deshalb Nenngrössenbereiche mit minimalen Fluktuationen, also Werte zwischen

$$MD_{\text{sub1}} = 133 \text{ Ncm} = [24; +5] \text{ und } MD_{\text{sub2}} = 146 \text{ Ncm} = [24; +4].$$

Der optimale Nennwert für die Produktion von Scharnieren im Toleranzband 50 bis 200 Ncm liegt damit in der logarithmischen Mitte von 133 Ncm und 146 Ncm, also bei 139,2 Ncm.

Das zweite Ziel bei der Produktion von Scharnieren ist es, den Prozess der Scharnierherstellung möglichst robust (also flexibel) gegenüber Störungen zu realisieren. Das Drehmoment MD entsteht im Produktionsprozess im wesentlichen durch das sog. Übermass. Das Übermass ist der Bolzendurchmesser des Scharniers plus zweimal die Buchsenwandstärke, es ist grösser als Scharnierlochdurchmesser, in den der Bolzen gepresst wird.

Die Einzelteile des Scharniers unterliegen in diesem Anwendungsbeispiel Toleranzen, die aus Kostengründen, wegen der mechanischen Fertigung, nicht weiter reduziert werden können, deshalb kommt es darauf an, die Nenngrössen auch der Einzelteile innerhalb jedes Toleranzbandes nach GS optimal zu bestimmen. Scharnierbolzen und

Scharnierlochdurchmesser liegen im Bereich um 12 mm, die Buchsenwandstärke bei 0,48 mm. Um die Abhängigkeiten des Drehmomentes MD von den Einzelteilen zu modellieren, sind verschiedene empirische Modellierungsverfahren bekannt.

In diesem Anwendungsfall wird ein empirisches Data Mining Verfahren zur Modellierung beschrieben, da es auf grösstmögliche Präzision des funktionalen Zusammenhanges zwischen Drehmoment und Einflussgrössen ankommt. Jede andere Modellierung, zum Beispiel eine lineare Modellierung zwischen Übermass und Drehmoment funktioniert entsprechend, hat aber geringere Modellgenauigkeiten.

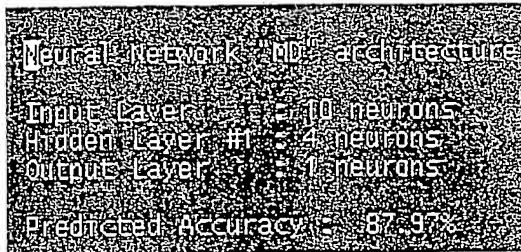
### 3. Aufnahme der Prozessdaten

Es ist Stand der Technik, dass mittels verschiedener Messaufnehmer und Leittechnik die Prozessdaten im vorgegebenen Prozesstakt, im Anwendungsbeispiel 10 Sekunden, mitgeschrieben und archiviert werden.

### 4. Prozessmodellierung und Sensitivitätsanalyse für die Zielgrösse

Es ist Stand der Technik zur Prozessmodellierung verschiedene Verfahren, analytische (wie Differentialgleichungen) oder empirische (wie lineare und nicht lineare Regressionen oder neuronale Netze einzusetzen, je nachdem wie gut der Prozess analytisch beschrieben werden kann. Für fertigungstechnische Prozesse, wie z.B. komplexe Montagen, werden auch wissensbasierte Verfahren verwendet, bei denen das Verhalten des Prozesses anhand seiner Prozessdaten gelernt wird, siehe M. Polke, Prozessleittechnik, Oldenbourg verlag, München/Wien 1994, S. 813-817.

Im vorliegenden Beispiel wurde die Prozessmodellierung durch eine neuronale Netzmodellierung realisiert. Die erreichte Genauigkeit liegt bei knapp 88%, d.h. mit knapp 88%iger Genauigkeit bezogen auf den Messbereich der Drehmomentmessung kann mit dem Modell aus 10 Eingangsgrössen der Drehmomentwert geschätzt werden:



Es ist weiterhin bekannt, die quantitative Abhängigkeit einer Qualitätsgrösse, im vorliegenden Beispiel das Drehmoment MD, von seinen Einflussgrössen durch eine modellbasierte Sensitivitätsanalyse zu realisieren, siehe R. Otte, Selbstorganisierende Merkmalskarten zur multivariaten Datenanalyse komplexer technischer Prozesse, Shaker Verlag, Aachen, 1999 und R. Otte et al., Data Mining für die industrielle Praxis, Carl Hanser Verlag, 2004. Die Fig. 8 zeigt das Ergebnis einer Sensitivitätsanalyse basierend auf den oben genannten neuronalen Modell der Scharnierproduktion.

Die Fig. 8 zeigt, dass die wichtigste Einflussgrösse für das Drehmoment MD der Bolzen DB1, dann der Bolzen DB2, dann der Kalibrierdorn DK ist. Die Temperaturen TW und TU haben den geringsten Prozesseinfluss auf das Drehmoment. Das bedeutet, dass die Änderungen der Temperatur im Mittel zu relativ geringeren Änderungen des Drehmomentes führen werden.

Durch den Verfahrensschritt 4 werden automatisch diejenigen Eingangsgrössen identifiziert, die einen Einfluss auf den Wert der Zielgrösse, im Beispiel das Drehmoment MD, haben.

#### 5. Prozessoptimierung für einen GS-optimalen Wert der Zielgrösse

Im Verfahrensschritt 5 werden für die wichtigsten Einflussgrössen bzw. Stellgrössen des Verfahrensschrittes 4 die konkreten quantitativen Nennwerte bestimmt, um den vorgegebenen Zielgrössenwert zu erreichen.

Es ist Stand der Technik empirisch gelernte Modelle für Aufgaben der Optimierung zu invertieren, um für gegebene Zielwerte, die dazugehörigen Werte der Einflussgrössen zu berechnen. Beispielsweise kann das Verhalten des Prozesses durch Self-Organizing Maps abgebildet werden, siehe EP 0 845 720 B1 und R. Otte, Selbstorganisierende

Merkmalskarten zur multivariaten Datenanalyse komplexer technischer Prozesse, Shaker Verlag, Aachen, 1999. Die Fig. 9 zeigt eine derartige modellbasierte Datenanalyse, die auf dem Verfahren der Self-Organizing Maps beruht.

Durch Verwendung eines Prozessmodells zu Optimierungsaufgaben kann für jeden vorgegebenen, GS-optimalen Wert der Zielgrösse, im Beispiel MD, berechnet werden, welche Eingangsgrössen letztendlich zu dem Zielwert führen. Damit werden erfindungsgemäss für jede GS-Berechnung des Zielgrössenwertes die dazugehörigen Werte der Einflussgrössen zurückberechnet.

Die Fig. 10 zeigt beispielhaft die Werte ausgewählter Eingangsgrössen Kalibrierdorn DK, Temperaturen, TW und TU, Scharnierhälftendurchmesser DS, Buchsenwandstärke BW und Bolzendurchmesser DB1, DB2, DB3 für die GS-optimale Zielgrösse MD = 139,2 Ncm = 1,392 Nm.

Damit sind die Eingangsgrössen bestimmt, die zu einem GS-optimalen Zielgrössenwert  $y_{GS}$ , im Beispiel MD = 1,392 Ncm, führen.

#### 6. Global Scaling Analyse der wichtigsten Einflussgrössen

Durch Anwendung des Verfahrensschrittes 1 und 2 ist die Bestimmung aller GS optimalen Werte  $y_{GSi}$  der Zielgrösse im vorgegebenen Toleranzband  $y_{min}$  und  $y_{max}$  durchgeführt. Durch Anwendung der Verfahrensschritte 3, 4 und 5 sind die dazugehörigen Eingangsgrössenwerte des Prozesses ermittelt.

Wenn es im Intervall aus Produktsicht nur einen einzigen optimalen GS-Wert  $y_{GS}$  gibt, dann wird der hier beschriebene Verfahrensschritt 6 übersprungen und die zu dem GS-Wert  $y_{GS}$  zugehörigen Stellgrössen nach Verfahrensschritt 5 und 7 berechnet. Sind mehrere gleichberechtigte GS optimale Werte  $y_{GSi}$  vorhanden, dann folgt die Auswahl durch die GS-Analyse der Eingangsgrössen durch mehrmalige Anwendung des Verfahrensschrittes 5, d.h. der Rückrechnung der zu einem Optimum  $y_{GSi}$  führenden Eingangsgrössen.

Damit sind die Zahlenwerte der Eingangsgrößen bestimmt. Auch diese Zahlenwerte unterliegen der GS-Struktur, wie die Fig. 11 am Beispiel der Temperatur TW zeigt.

Nach der Ermittlung der konkreten Eingangsgrößenwerte nach Verfahrensschritt 5 wird für jeden der gefundenen Eingangswerte  $x_{ni}$  die GS-Analyse nach Verfahrensschritt 2 durchgeführt. Damit werden für die wichtigsten Eingangsgrößen die GS optimalen Werte ermittelt. Die GS- optimalen Eingangswerte hängen von dem Typ der Eingangsgrösse ab.

Die Eingangsgrößen sind für folgende Typen GS-optimal:

- a) Eingangsmessgrößen: Optimum nach GS durch Ermittlung der maximalen Auftretswahrscheinlichkeit, da diese Wertrealisierungen auch in Zukunft am häufigsten auftreten werden.
- b) Sind die Eingangsmessgrößen Messwerte von technischen Produkten so können die Nenngößen für diese Werte nach GS optimiert werden.  
Im vorliegenden Fall ist beispielsweise die Buchsenwandstärke BW im Bereich 0,46 mm bis 0,5 mm zu optimieren.  

$$BW_{\text{unten}} = 0,46\text{mm} = [21 \ 3 \ 3 \ -3 \ 3 \ 5]$$

$$BW_{\text{Nenn}} = 0,48\text{mm} = [21 \ 3 \ 3 \ 21 \ 6 \ -9]$$

$$BW_{\text{oben}} = 0,5\text{mm} = [21 \ 3 \ 6 \ -3 \ 3 \ -3]$$
 Als Nenngröße ist damit der Wert  $BW = 0,471 \text{ mm}$  nach GS gleich  $[21 \ 3 \ 3 \ -5]$  und damit optimal, da er in einer Lücke auf  $n_3$  liegt.
- c) Eingangsstellgrößen: Optimierung nach GS hinsichtlich Superflexibilität, da diese Werte am unempfindlichsten auf Änderungen im Wert selber und im Prozess reagieren.

Im Verfahrensschritt 6 wurde für jeden GS-optimalen Zielgrößenwert, nach Verfahrensschritt 2, und seiner dazugehörigen Eingangsgrößen, nach Verfahrensschritt 4 und 5, eine GS-Analyse durchgeführt, wodurch eine vollständige GS-Analyse des Prozesses realisiert ist.

## 7. Bestimmung des optimalen Prozesszustandes

Im Verfahrensschritt 7 wird aus der Menge aller nach GS möglichen Prozesszuständen, der GS-optimale Prozesszustand ausgewählt und die dazugehörigen Stellgrößen ermittelt.

Das Prozessoptimum ist für die maximale Anzahl von GS-optimalen Eingangsgrößen erreicht, für die die Zielgrösse  $y_{GSi}$  gerade GS-optimal ist. Sind mehrere Zielgrössenwerte gleichberechtigt, so ist derjenige Wert  $y_{GSi}$  der weiter in der logarithmischen Mitte des Intervalls  $y_{min}$  und  $y_{max}$  liegt der optimale.

Aus der Menge der zum gefundenen Optimum  $y_{GS}$  gehörenden Eingangsgrößen  $x_{1GS}$ ,  $x_{2GS}$ ,  $x_{3GS}$ , ...,  $x_{nGS}$  wird die Untermenge der Stellgrößen  $x_{StellGS}$  ausgelesen.

Damit ist das Optimum für den fertigungs- oder verfahrenstechnischen Prozess gefunden und die Stellgrößen  $x_{StellGS}$  zur Erreichung des Optimums werden über die vorhandene Leittechnik an den Prozess ausgegeben.

#### 8. Ausgabe der GS-optimalen Werte an den Prozess

Die GS optimierten Werte der Stellgrößen des optimalen Prozesszustandes nach Verfahrensschritt 7 werden beispielsweise über eine Leittechnik oder eine SPS an den technischen oder chemischen Prozess ausgegeben, womit der Prozess erfindungsgemäss nach GS optimiert ist.

### Patentansprüche

1. Verfahren zur Stabilisierung von technischen Prozessen, gekennzeichnet durch die nachstehenden Schritte:
  - a) Aufnahme und Auswahl der Daten und Aufbereitung der Daten,
  - b) GS Analyse des Zielwertes innerhalb des vorgegebenen Toleranzbandes
  - c) Automatische Prozessmodellierung und Sensitivitätsanalyse zur Bestimmung der für die gewählten Zielgrößen  $y_i$  wichtigsten Einflussgrößen  $x_i$ ,
  - d) Auswahl der im Toleranzband GS optimalen Zielgrößenwerte und Rückrechnung auf die dazugehörigen Eingangsgrößenwerte, Nennwerte, aller Einflussgrößen durch gängige Optimierungsverfahren
  - e) GS Analyse der unter d) berechneten Nennwerte der Einflussgrößen und
  - f) Wiederholung der Verfahrensschritte d) und e) bis zu einem GS optimalen Zielgrößenwert aus dem vorgegebenen Toleranzband alle wichtigen GS optimalen Nennwerte der Einflussgrößen und Stellgrößen gefunden wurden
  - g) Ausgabe der GS optimalen Stellgrößen an den Prozess
2. Verfahren zur Stabilisierung von technischen Prozessen, dadurch gekennzeichnet, dass mehrere Zielgrößen gleichzeitig und zusammenhängend nach Global Scaling (GS) optimiert werden, indem die ausgewählten Zielgrößen durch eine beliebige mathematische Funktion miteinander verknüpft werden und die resultierende Gütefunktion (G) GS-optimiert wird.
3. Verfahren nach Anspruch 2, bei dem alle für die Optimierung relevanten Größen durch eine Analyse auf Grundlage von Global Scaling Verfahren hinsichtlich Flexibilität und Stabilität optimiert werden, indem eine Global Scaling Analyse von Daten der relevanten Parameter und die dazugehörigen Zielgrößen realisiert wird.



4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass der Prozess selbst optimiert wird.
5. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Produkte die durch einen Prozess hergestellt werden optimiert werden.
6. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche 2 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass zur GS Optimierung einer Zielgrösse auch die Einflussgrössen des Prozesses einer GS Analyse und Optimierung unterzogen werden.
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass Prozesse resp. Produkte des Maschinenbaus oder der chemischen Industrie stabilisiert bzw. optimiert werden.

## Drehmoment MD über die Zeit

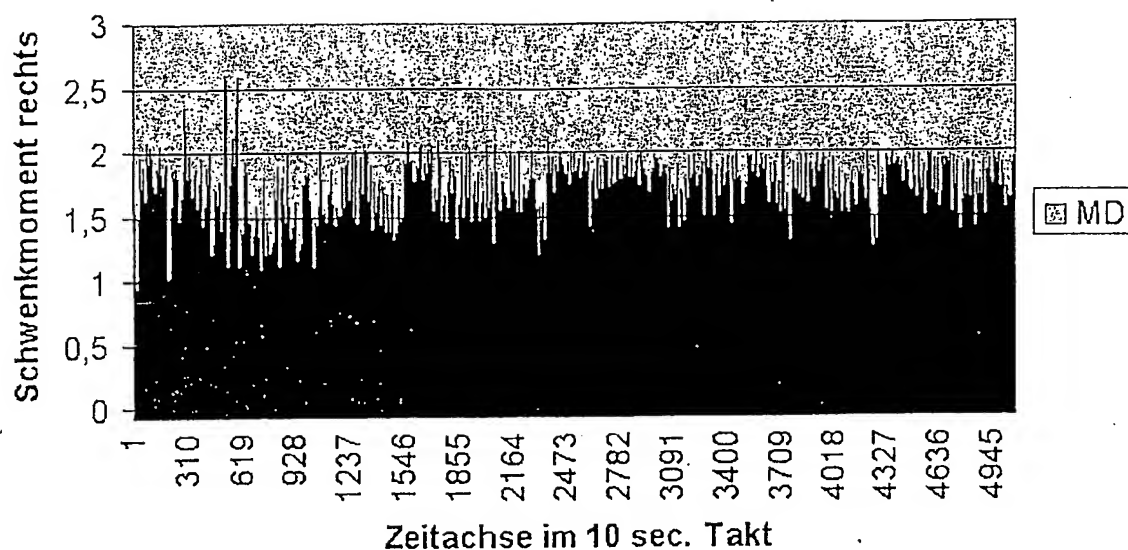


Fig. 1 Gemessenes Drehmoment MD eines produzierten Scharnieres über die Zeit (Zeitachse in 10 Sekunden-Takt)

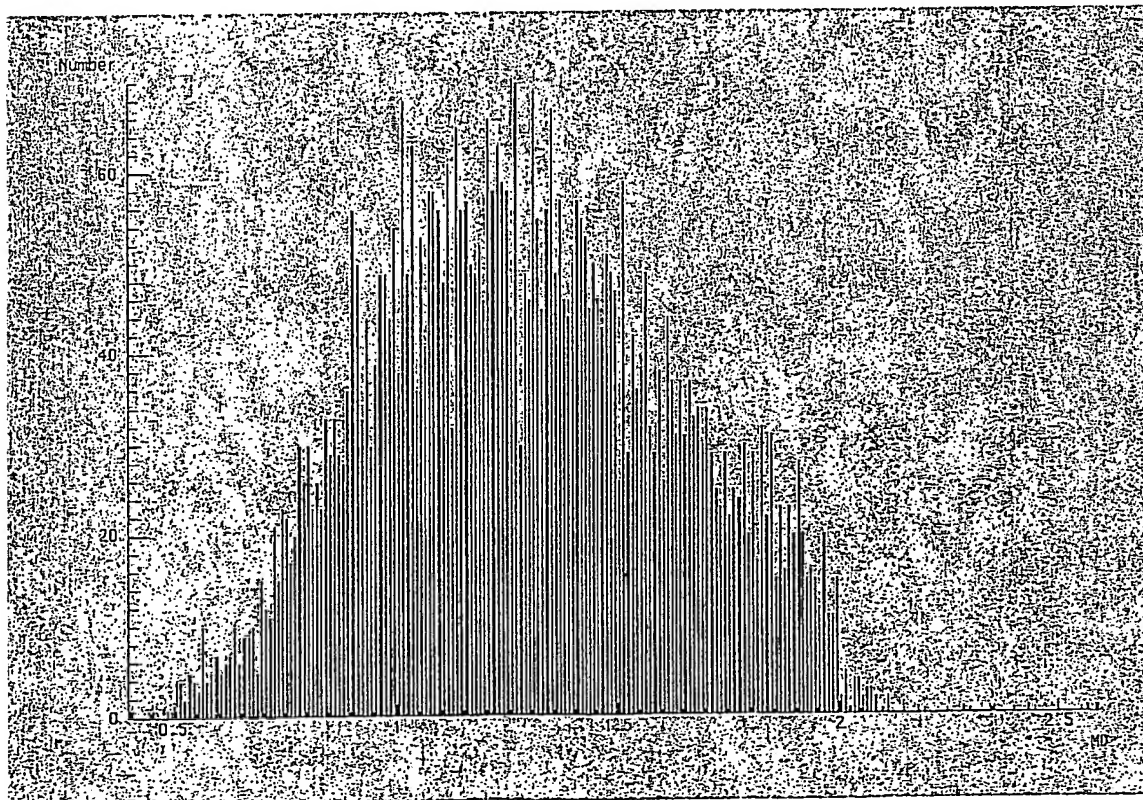


Fig. 2 Histogramm des Drehmomentes MD mit dem Messbereich 0 Nm bis 2,5 Nm auf der X-Achse

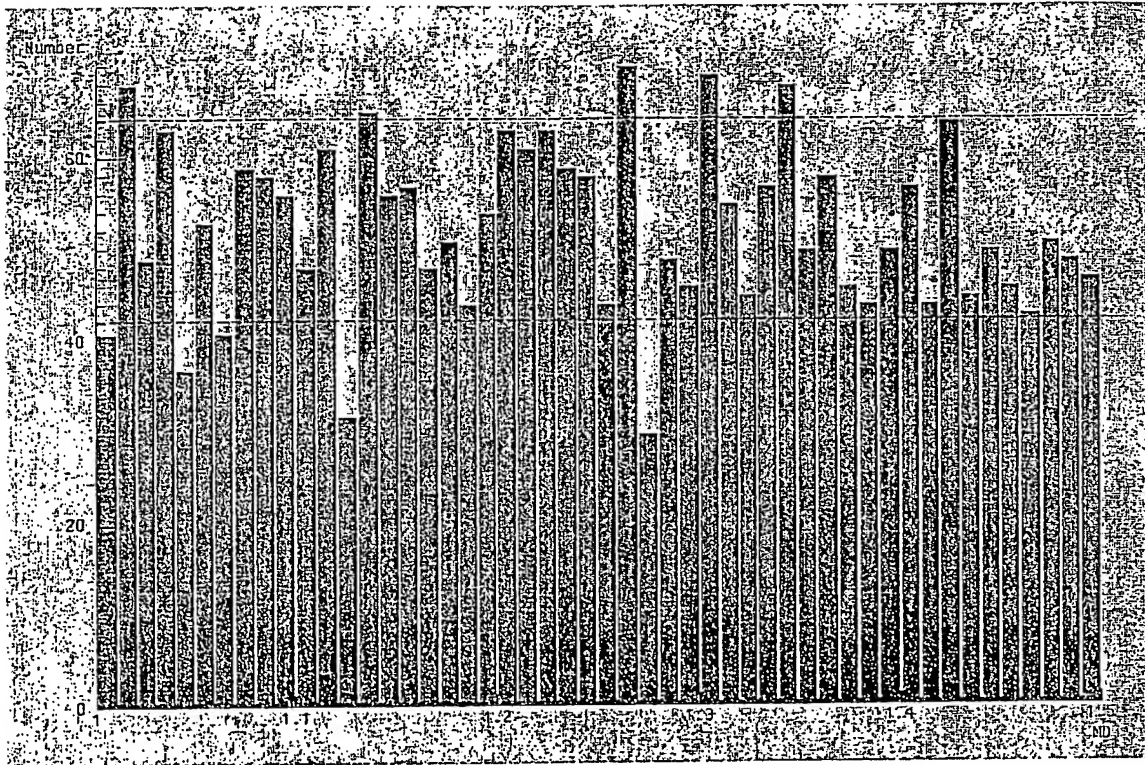


Fig. 3 Ein Histogramm des Drehmomentes MD mit dem Messbereich 1,0 Nm bis 1,5 Nm auf der X-Achse

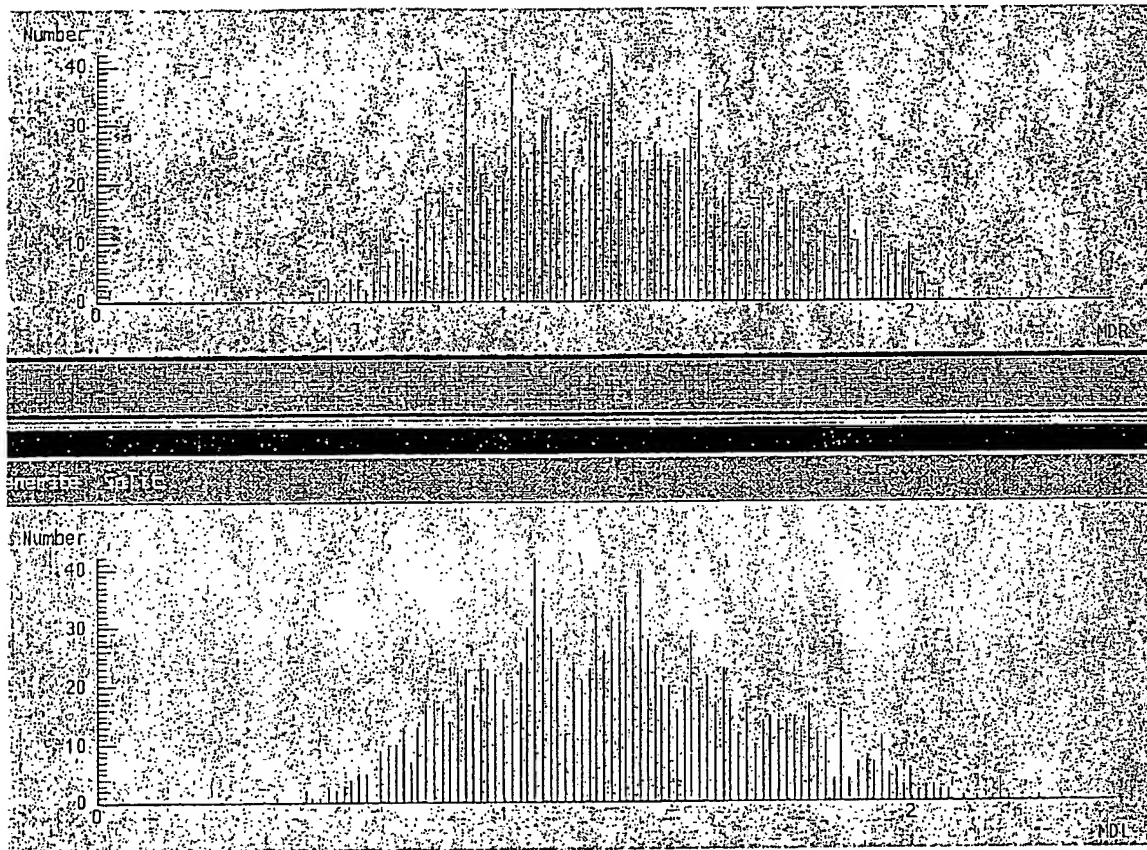


Fig. 4 Feinstruktur von Histogrammen zweier Produktionslinien für rechte und linke Scharniere, die 3 Tage lang zeitgleich produziert wurden

a), Scharniere links MDL b) Scharniere rechts MDR

Aktueller DS:

Nr.:  Of. Bezeichnung:  Kategorie:

SubY:  SubZ:  SubX:

InY:  InZ:  InX:

Maß:  W:

X:  1

dX:  0

dX:  0

☐ X übernehmen

TeilZ:  2

GlobH:  2

GlobC:  1.5

SubV:  -4.98447455762145

InV:  -4.9856458509444

SubN0:  24    InN0:  24

SubN1:  6    InN1:  6

SubN2:  5    InN2:  5

Fig. 5 Werkzeug GSC3000 zur GS-Analyse von physikalischen und technischen Größen

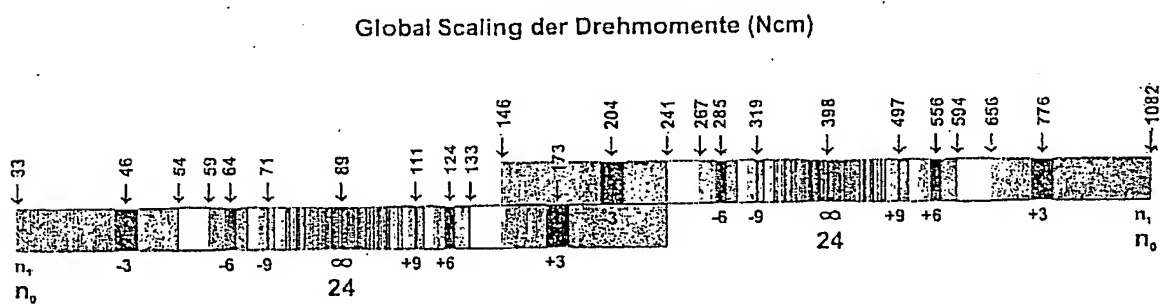


Fig. 6 GS-Analyse des Drehmomentes (In Ncm) von Kfz-Scharnieren



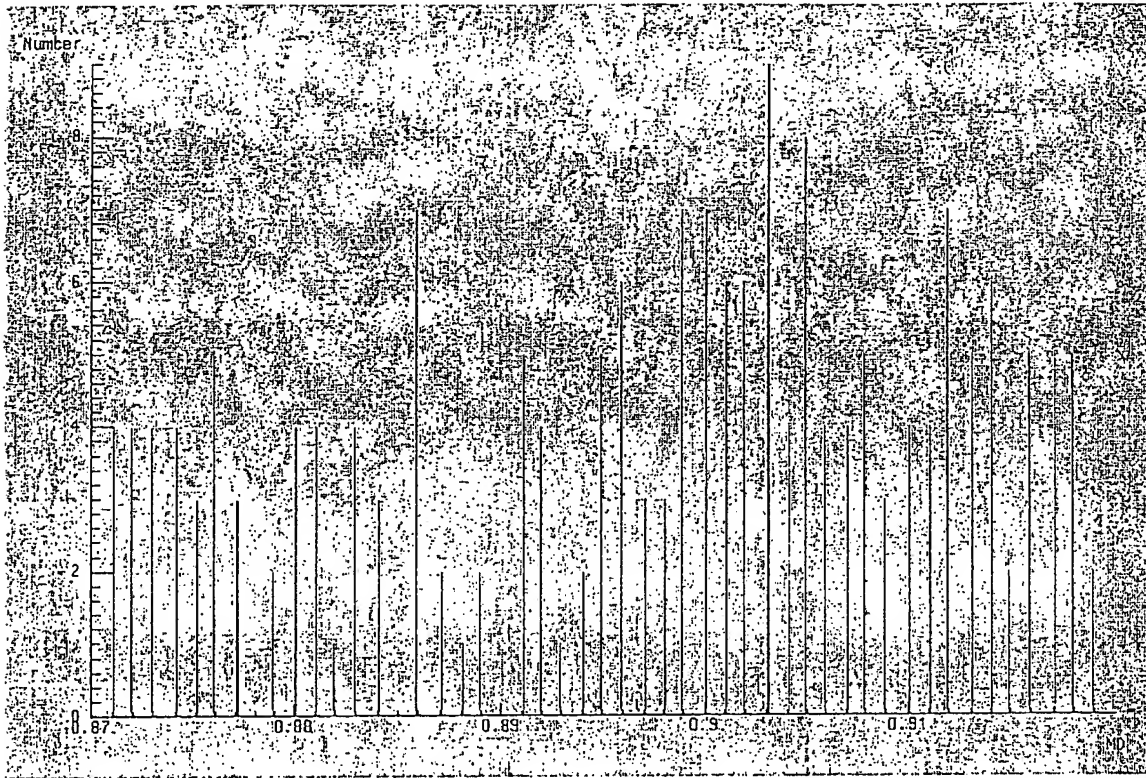


Fig. 7 Histogramm der erzeugten Drehmomente im Bereich 0,87 bis 0,92 Nm

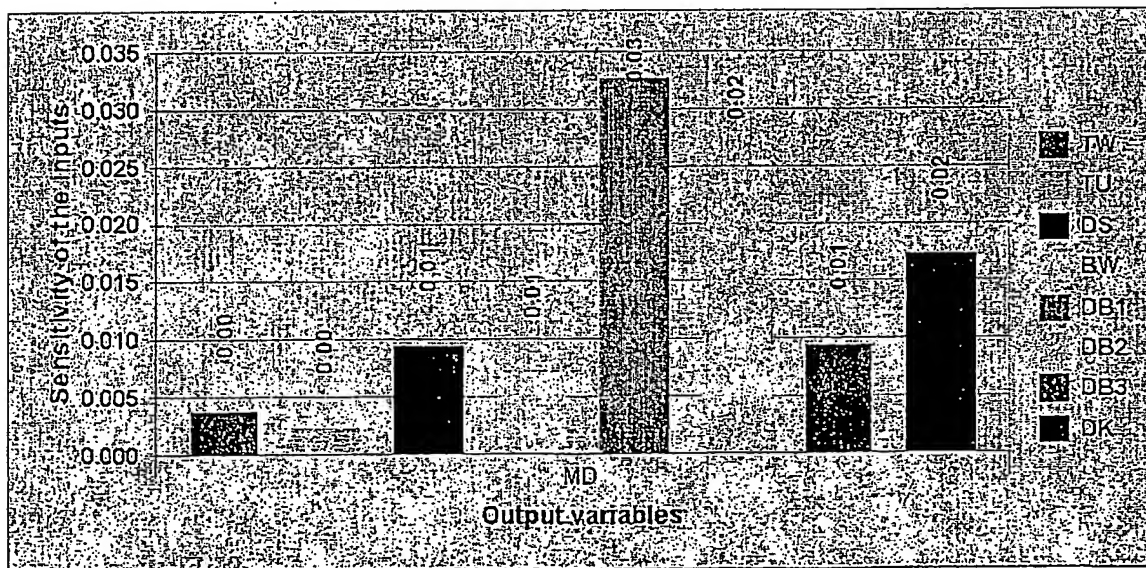


Fig. 8 Sensitivitätsanalyse einer Scharnierproduktion (Sensitivity der Inputs zur Output-Variablen MD)

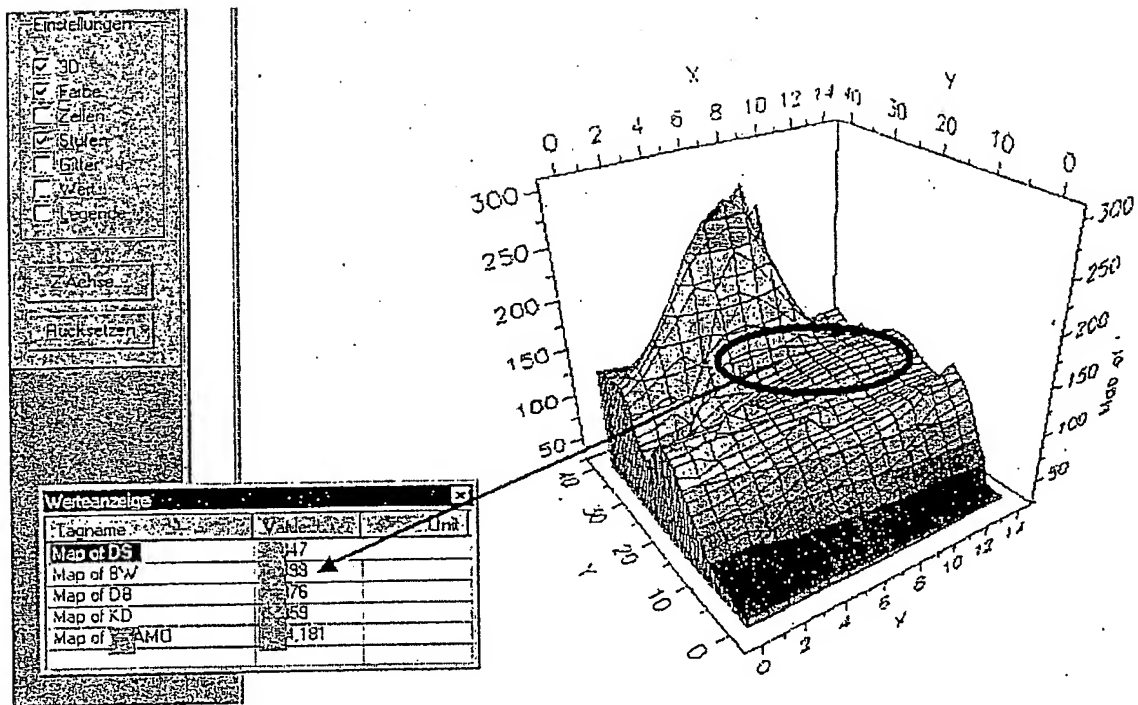


Fig. 9 Prozessoptimierung mittels Self-Organizing Maps durch automatische Rückrechnung von der Zielgrösse MD auf die einzustellenden Eingangswerte

ID	TIME	TIME	DK	DORSBS	TW	DS	8W	DB	KD	AMD	MDmax	MDmin	MDavg
1234	AAB-R	0,019	90	23,81	25,23	0,01382	0,000465	0,013957	0,013926	0,013954	1,319	1,457	1,392
1123	AAG-R	0,019	90	24,33	24,47	0,01401	0,000471	0,013962	0,013956	0,013955	1,38	1,435	1,392
4321	KKA-R	0,019	80	22,39	23,55	0,01289	0,000484	0,013961	0,013958	0,013942	1,357	1,438	1,392
2468	RTC-R	0,017	70	25,11	24,7	0,01405	0,000468	0,013969	0,013966	0,013943	0,046	1,445	1,392
12	UKG-R	0,019	90	23,35	23,95	0,01313	0,000473	0,013967	0,013965	0,013947	1,37	1,419	1,392
1357	AAT-R	0,02	90	24,36	24,21	0,01199	0,000471	0,013987	0,013967	0,013955	1,369	1,427	1,392

Fig. 10 Darstellung von möglichen Eingangsgrößen für Scharniere mit Zielgrösse Drehmoment MD = 1,392 Nm

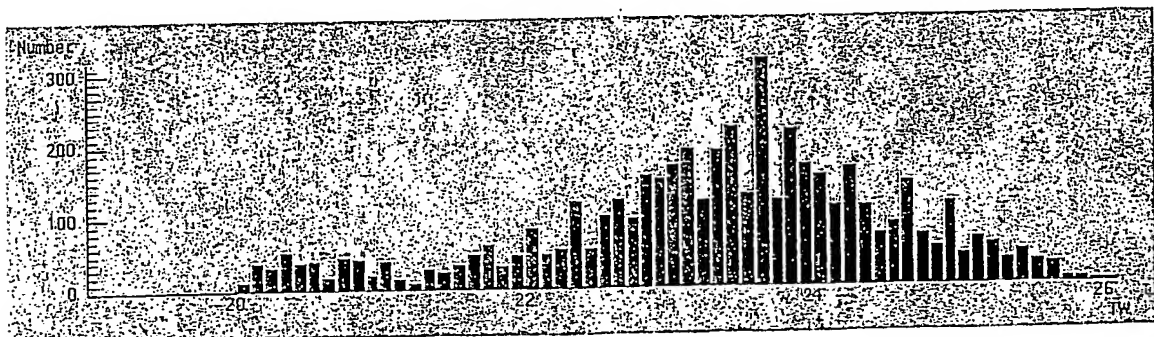


Fig. 11 Histogramm der Temperatur TW einer Produktionslinie für die Fertigung von Scharnieren